



TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI PENGURANGAN ARUS *INRUSH* PADA  
TRANSFORMATOR DAYA GARDU INDUK KENJERAN 150  
KV DENGAN PENAMBAHAN *VCT-ICL***

Rudy Prasetyo  
NRP 2213105056

Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MT  
Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



*FINAL PROJECT - TE 141599*

*STUDY FOR REDUCING POWER TRANSFORMER INRUSH  
CURRENT AT 150 KV KENJERAN SUBSTATION BY ADDING VCT-ICL*

Rudy Prasetyo  
NRP 2213105056

Lecturer Counselor  
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MT.  
Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.

*ELECTRICAL ENGINEERING*  
*Faculty of Industrial Technology*  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015

**STUDI PENGURANGAN ARUS INRUSH PADA  
TRANSFORMATOR DAYA GARDU INDUK KENJERAN 150 KV  
DENGAN PENAMBAHAN VCT-ICL**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MT.**  
**NIP. 1970 07 12 1998 02 1001**

**Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.**  
**NIP. 1981 09 05 2005 01 1002**

**SURABAYA  
JULI, 2015**

## ABSTRAK

Pada tugas akhir ini, akan dibahas pengurangan arus *inrush* dengan metode VCT-ICL. Metode VCT-ICL adalah modifikasi metode *DC reactor-type inrush current limiter* dengan menambahkan komponen VCT. Kontribusi komponen VCT adalah untuk mengurangi distorsi pada gelombang tegangan. Objek studi tugas akhir ini adalah transformator daya 150 KV Gardu Induk Kenjeran. Dan program simulasi yang digunakan adalah ATP-EMTP.

Inti pemodelan pada tugas akhir ini ada 3 macam kondisi, yaitu pemodelan eksisting sistem (sebelum dipasang VCT-ICL), pemodelan setelah dipasang ICL (*DC reactor*), dan pemodelan setelah dipasang VCT-ICL. Kemudian dari hasil pemodelan tersebut didapatkan perbandingan arus *inrush* dan tegangan dari ketiga macam kondisi tersebut.

Besarnya nilai impedansi pada VCT-ICL sebanding dengan nilai arus *inrush* yang dikurangi, sehingga metode ini cukup fleksibel untuk mengurangi arus *inrush* seperti halnya ICL (*DC reactor*). Namun hasil simulasi membuktikan bahwa distorsi pada gelombang tegangan paling besar terjadi pada kondisi setelah dipasang ICL (*DC reactor*). Kemudian setelah dipasang VCT pada ICL dengan nilai parameter *DC reactor* yang sama, distorsi yang dihasilkan akibat pemasangan *DC reactor* dapat dikurangi.

**Kata kunci :** arus *inrush*, transformator daya, VCT-ICL.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## **ABSTRACT**

*In this final project, inrush current reduction by VCT-ICL method will be explained. VCT-ICL method is a modified from DC-type reactor inrush current limiter method by adding VCT component. VCT component contribute to reduce distortion on the voltage waveform. The object of this final project is 150 KV power transformers of Kenjeran substation. And a simulation program used is ATP-EMTP.*

*The main discussion in this final project are three kinds of conditions, there are the existing modeling system (before being installed VCT-ICL), modeling after being installed ICL (DC reactor), and modeling after being installed VCT-ICL. Then from the modeling results obtained inrush current and voltage of the three kinds of conditions.*

*The value of the impedance at the VCT-ICL is proportional to the value of inrush current is reduced, so this method is flexible enough to reduce the inrush currents such as ICL (DC reactor). But the simulation results prove that the distortion in most large voltage occurs in conditions after being installed ICL (DC reactor). Then after VCT installed on the ICL with DC reactor parameter values are same, distortion generated due to the installation of the DC reactor can be reduced.*

**Keyword** : inrush current, power transformer, VCT-ICL

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## **KATA PENGANTAR**

Dengan mengucapkan puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah serta karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul :

### **“STUDI PENGURANGAN ARUS INRUSH PADA TRANSFORMATOR DAYA GARDU INDUK KENJERAN 150 KV DENGAN PENAMBAHAN VCT-ICL”**

Tugas Akhir ini merupakan sebagian syarat untuk menyelesaikan studi dan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Strata-1 Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dengan selesainya Tugas Akhir ini penulis menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Orang tua tercinta yang telah memberikan dukungan moral, material dan doa.
2. Bapak Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MT selaku dosen pembimbing 1.
3. Bapak Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT selaku dosen pembimbing 2.
4. Bapak Ir. Teguh Yuwono selaku koordinator bidang studi Teknik Sistem Tenaga
5. Seluruh staf pengajar dan administrasi Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS.
6. Semua pihak yang telah banyak membantu untuk menyelesaikan tugas akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Harapan saya sebagai penulis adalah semoga terselesaikannya Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi saya serta pembaca. Sadar atas keterbatasan yang dimiliki oleh penulis karena hasil dari Tugas Akhir ini jauh dari kesempurnaan. Demikian penulis sudah berusaha semaksimal mungkin. Dan pintu maaf serta saran kritik yang membangun penulis harapkan.

Surabaya, Juli 2015

Penulis



**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## **TABLE OF CONTENT**

<b>COVER</b>	
<b>APPROVAL SHEET</b>	
<b>ABSTRACT<sub>id</sub></b> .....	iii
<b>ABSTRACT<sub>en</sub></b> .....	v
<b>PREFACE</b> .....	vii
<b>TABLE OF CONTENT</b> .....	ix
<b>ILLUSTRATION</b> .....	xi
<b>TABLES</b> .....	xiii
 <b>CHAPTER I. INTRODUCTION</b> .....	 1
1.1. Background .....	1
1.2. Main Problems .....	2
1.3. Organization of Book .....	2
 <b>BAB II. ABOUT INRUSH CURRENT AND VCT-ICL (VOLTAGE COMPENSATION TYPE-INRUSH CURRENT LIMITTER)</b> .....	 5
2.1. Inrush Current .....	5
2.1.1. inrush current happened process.....	6
2.1.2. inrush current value .....	8
2.1.3. Factors that Obtain Inrush Current.....	9
2.1.4. Inrush Current Effect .....	10
2.2. VCT-ICL.....	10
2.2.1. Principle of Operation.....	11
2.2.2. DC Reactor Evaluation .....	17
2.3. Harmonic.....	17
2.3.1. Total Harmonic Distortion (THD).....	18
 <b>BAB III. SIMULATION OF 150 KV POWER TRANSFORMER GI KENJERAN AND VCT-ICL</b> .....	 21
3.1. Profile of 150 KV Power Transformer GI Kenjeran .....	21
3.2. Simulation of Existing .....	22
3.3. Simulation of Existing with ICL (DC Reactor) .....	27
3.3.1. D1, D2, D3, And D4 Component .....	27
3.3.2. Reactor Component.....	28
3.3.3. Installing ICL.....	28
3.4. Simulation of Existing with VCT-ICL.....	29
3.4.1. Simulation of VCT (Voltage Compensation Type).....	29

3.4.2. Installing VCT .....	32
<b>BAB IV. RESULT OF SIMULATION</b> .....	33
4.1. Result of Simulation when Existing .....	33
4.2. Result of Simulation After Installing ICL (DC Reactor) .....	33
4.3. Result of Simulation After Installing VCT-ICL .....	33
4.3. Comparison of THDv After Installing DC Reactor and After Installing VCT-ICL .....	37
<b>BAB V. CLOSING</b> .....	39
5.1. Conclusion .....	39
<b>REFERENCES</b> .....	41
<b>ENCLOSURE</b> .....	43
<b>BIOGRAPHY</b> .....	47

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kurva Arus <i>Inrush</i> 1 Fasa .....	6
Gambar 2.2 Kurva Tegangan, Flux, dan Arus Ketika Diberi Tegangan dengan Sudut pada Operasi Kontinyu.....	6
Gambar 2.3 Kurva Tegangan, Flux, dan Arus Ketika Diberi Tegangan dengan Sudut 0° pada Operasi Awal Dimulai .....	7
Gambar 2.4 Skema Penempatan Pemasangan VCT-ICL.....	11
Gambar 2.5 Konfigurasi Rangkaian VCT-ICL .....	11
Gambar 2.6 Kurva Rangkaian Saat Keadaan <i>Restricted</i> .....	12
Gambar 2.7 Rangkaian Ekuivalen Saat Keadaan <i>Restricted</i> .....	13
Gambar 2.8 Kurva Arus Terminal dan Arus Pada <i>DC Reactor</i> .....	14
Gambar 2.9 Rangkaian Saat Keadaan <i>Freewheeling</i> .....	15
Gambar 2.10 Gelombang Fundamental Dengan Gelombang Harmonisnya.....	18
Gambar 3.1 Transformator Daya 150 KV di GI Kenjeran.....	21
Gambar 3.2 <i>Single Line Diagram</i> Salah Satu Transformator.....	22
Gambar 3.3 Pemodelan <i>Single Line Diagram</i> Gambar 3.2 Dengan Program Simulasi ATP .....	23
Gambar 3.4 Pemodelan Kurva Magnetisasi Inti Besi.....	26
Gambar 3.5 Pemodelan <i>DC Reactor</i> Dengan Program Simulasi ATP .....	27
Gambar 3.6 Pemodelan Dioda Penyearah <i>DC Reactor</i> Dengan Program Simulasi ATP .....	27
Gambar 3.7 Pemodelan Reaktor Dengan Program Simulasi ATP .....	28
Gambar 3.8 Pemodelan <i>Single Line Diagram</i> Setelah Dipasang <i>DC Reactor</i> Dengan Program Simulasi ATP .....	29
Gambar 3.9 Pemodelan VCT Dengan Program Simulasi ATP.....	30
Gambar 3.10 Pemodelan Dengan Program Simulasi ATP Setelah Pemasangan VCT-ICL.....	32
Gambar 4.1 Kurva Arus <i>Inrush</i> 3 Fasa Sebelum Dipasang VCT-ICL	34
Gambar 4.2 Kurva Arus <i>Inrush</i> 3 Fasa Setelah Dipasang IC ( <i>DC Reactor</i> ) .....	34
Gambar 4.3 Kurva Arus <i>Inrush</i> 3 Fasa Setelah Dipasang VCT-ICL .	34
Gambar 4.4 Kurva Tegangan Terminal 3 Fasa Sebelum Dipasang VCT-ICL .....	35
Gambar 4.5 Kurva Tegangan Terminal 3 Fasa Setelah Dipasang ICL ( <i>DC Reactor</i> ) .....	35

Gambar 4.6 Kurva Tegangan Terminal 3 Fasa Setelah Dipasang VCT-ICL.....	35
Gambar 4.7 Prosentase Pengurangan Arus <i>Inrush</i> Berdasarkan Nilai $L_d$ .....	36
Gambar 4.8 THDv saat menggunakan DC <i>Reactor</i> dan VCT-ICL .....	37

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Arus *inrush* adalah salah satu fenomena yang dapat terjadi pada transformator daya. Nilainya yang cukup tinggi dapat menyebabkan berbagai masalah pada sistem listrik dan transformator daya. Dampaknya dalam jangka pendek akan menyebabkan terjadinya sistem proteksi transformator mengalami kesalahan kerja dan penurunan kualitas daya dari sistem tenaga listrik. Dan dampak jangka panjangnya akan memperpendek *lifetime* transformator daya karena pengaruhnya langsung terhadap kualitas isolasi transformator dan belitan tranformator. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk mengurangi nilai arus *inrush* untuk mencegah dampak-dampak negatif yang ditimbulkan arus *inrush*. [1]

Ada beberapa metode untuk mengurangi nilai arus *inrush*, diantaranya adalah *SPE (Sequential Phase Energisation)*, *DC reactor-type inrush current limiter*, *superconducting inrush current limiter*, *asymmetric winding configuration* dan lain sebagainya. Diantara metode-metode tersebut, *DC reactor-type inrush current limiter* dapat secara efektif mengurangi arus *inrush* dengan menaikkan nilai impedansi. Aplikasi metode ini juga tidak memerlukan tambahan rangkaian kontrol. Namun metode ini dapat menghasilkan distorsi pada gelombang arus dan tegangan sistem. Ada sebuah metode baru untuk mengatasi kekurangan metode *DC reactor-type inrush current limiter*, yaitu *VCT-ICL (Voltage Compensation Type – Inrush Current Limiter)*. Metode ini adalah modifikasi dari metode *DC reactor-type inrush current limiter* yang ditambahkan komponen *VCT (Voltage Compensation Type)* untuk mengurangi distorsi yang ditimbulkan akibat *DC Reactor*. [2]

Pada tugas akhir ini, akan dilakukan studi simulasi metode *VCT-ICL* dengan program simulasi *ATP-EMTP (Alternative Transient Program- Electromagnetic Transient Program)*, karena pembahasan mengenai arus *inrush* pada transformator berhubungan dengan transien elektromagnetik. Objek pemodelan transformator daya untuk tugas akhir ini adalah transformator daya 150 KV di Gardu Induk Kenjeran.

## 1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini adalah bagaimana memodelkan transformator daya 150 KV GI kenjeran dengan program simulasi ATP-EMTP, sehingga didapatkan nilai arus *inrush* dan gelombang tegangan eksisting sistem. Setelah itu, bagaimana memodelkan penerapan metode *DC reactor-type inrush current limiter* dan VCT-ICL (*Voltage Compensation Type – Inrush Current Limiter*) dengan parameter-parameter yang telah ditentukan. Dan akhirnya bagaimana perbandingan arus *inrush* dan gelombang tegangan sistem saat tanpa menggunakan metode, setelah metode ICL (*DC Reactor*), dan setelah metode VCT-ICL.

Batasan masalah untuk tugas akhir ini adalah objek utama yang dianalisa adalah arus *inrush*. Kemudian, karena keterbatasan kemampuan perangkat simulasi, maka pemodelan transformator daya 150 KV disesuaikan. Fokus tugas akhir ini yang penting adalah keefektifan metode VCT-ICL untuk mengurangi arus *inrush* dan berapa persentase pengurangannya. Dan mengingat tugas akhir ini dilakukan melalui simulasi, maka tidak dibahas aplikasinya secara langsung.

Tujuan dari tugas akhir ini adalah mengaplikasi melalui simulasi metode VCT-ICL dalam upaya untuk mengurangi arus *inrush* pada transformator daya 3 fasa. Kemudian menganalisa pengurangan arus *inrush* yang ditimbulkan.

## 1.3 Sistematika Penulisan

Sistematika pembahasan Tugas Akhir ini terdiri dari lima BAB. Untuk BAB I (Pendahuluan) didalamnya Membahas tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, maksud dan tujuan, sistematika laporan, serta relevansi.

Untuk BAB II (Teori Penunjang) Berisi teori penunjang tentang arus *inrush* hingga dampak yang ditimbulkan. Selain itu juga dibahas teori tentang VCT-ICL.

Pada BAB III (Pemodelan Transformator Daya 150 KV GI Kenjeran dan Dengan Pemasangan VCT-ICL) tentang bagaimana pemodelan transformator daya 150 KV pada program simulasi ATP-EMTP beserta pemodelan metode VCT-ICL dan *DC reactor-type inrush current limiter*.

BAB IV (Analisa Hasil Simulasi Arus *Inrush* Tanpa dan Dengan Metode Pemasangan Komponen VCT-ICL) membahas tentang hasil

simulasi dari pemodelan yang telah dilakukan. Kemudian dibahas mengenai analisa tentang hasil simulasi.

Terakhir pada BAB V (Penutup) Menjelaskan tentang kesimpulan dari tugas akhir ini. Kemudian juga berisi tentang saran-saran yang timbul dari hasil tugas akhir ini.



**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## **BAB II**

### **TEORI TENTANG ARUS *INRUSH* DAN VCT-ICL (*VOLTAGE COMPENSATION TYPE – INRUSH CURRENT LIMITTER*)**

Transformator adalah suatu peralatan listrik yang termasuk dalam klasifikasi mesin listrik statis dan berfungsi untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya, dengan frekuensi sama.

Salah satu fenomena yang dapat terjadi pada transformator daya adalah arus *inrush*. Arus *inrush* terjadi ketika energisasi saat awal terhubung dengan sumber tegangan. Dampak negatif dari keberadaan arus *inrush* memberi alasan untuk mencari cara mengurangi atau menekan nilai arus *inrush* sampai pada batas tertentu. Beberapa metode untuk mengurangi arus *inrush* pada umumnya adalah sebagai berikut:

1. *DC reactor-type inrush current limiter*
2. *superconducting inrush current limiter*
3. *controlling the energising angle*
4. *sequential phase energisation*
5. *virtual air gap*
6. *asymmetric winding configuration*

#### **2.1 Arus *Inrush* [3]**

Ketika transformator terhubung dengan sumber tegangan AC, arus awal yang muncul biasanya melebihi dari arus normal beban penuh. Arus ini dinamakan arus *inrush*. Berdasarkan penelitian arus *inrush* berdurasi 5-60 *cycle*. Namun arus *inrush* memiliki batas yang masih diijinkan menurut standart ANSI, NEMA dan standar dunia industri. Berdasarkan standart ANSI, batas arus *inrush* yang diijinkan adalah:

25xIn selama 0,01 detik

12xIn selama 0,1 detik

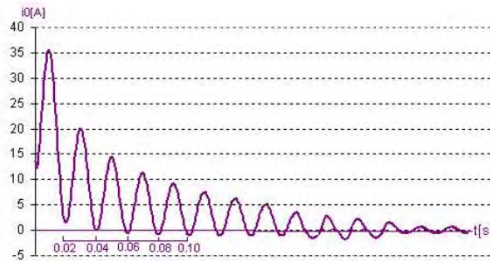
Berdasarkan standart NEMA:

10xIn

Dan berdasarkan standart dunia industri:

12xIn selama 0,1 detik

Dimana In adalah arus nominal pada beban penuh pada sisi yang terhubung oleh sumber tegangan. Contoh bentuk arus *inrush* dapat dilihat pada gambar 2.1.

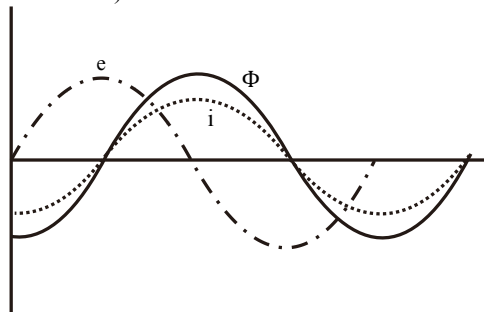


**Gambar 2.1** Kurva Arus *Inrush* 1 Fasa [4]

### 2.1.1 Proses Terjadinya Arus Inrush [5]

Jika kumparan primer transformator tiba-tiba terhubung dengan sumber tegangan AC yang gelombang tegangannya berada dipuncak positifnya. Pada kondisi ini, agar transformator mampu menghasilkan drop tegangan lawan untuk mengimbangi tegangan sumber, maka fluks magnetik meningkat dengan cepat. Efek dari meningkatnya fluks magnetik dengan cepat adalah arus belitan naik dengan cepat.

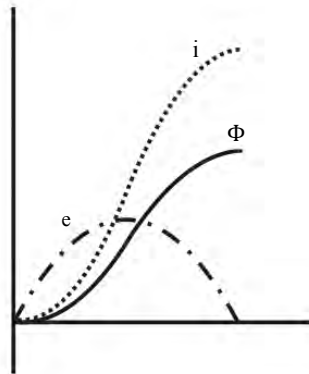
Pada kondisi lain, yaitu saat kumparan primer transformator terhubung dengan sumber tegangan AC yang gelombang tegangannya tepat berada pada titik nol. Selama operasi kontinyu transformator, ketika gelombang tegangan tepat berada pada titik nol, saat itulah baik fluks maupun arus belitan berada pada nilai puncak negatif, kondisi ini ditampilkan pada gambar 2.2. Dengan kecepatan perubahan fluks adalah nol ( $d\Phi/dt = 0$  dan  $di/dt = 0$ ).



**Gambar 2.2** Kurva Tegangan, Flux, dan Arus Ketika Diberi Tegangan dengan Sudut pada Operasi Kontinyu [3]

Saat gelombang tegangan naik menuju nilai puncak positifnya, gelombang fluks dan arus naik menuju nilai kecepatan perubahan fluks maksimum positif, dan selanjutnya menuju nilai puncak positif saat gelombang tegangan menuju titik nol.

Pada transformator ideal, arus magnetisasi akan naik sekitar dua kali arus normalnya, seperti pada gambar 2.3. kemudian membangkitkan mmf yang diperlukan untuk menciptakan fluks yang lebih tinggi dari normalnya. Namun, sebagian besar transformator tidak dirancang dengan batas yang cukup antara puncak fluks normal dan batas saturasi, sehingga inti transformator akan mencapai kondisi saturasi pada setengah *cycle* pertama. Selama saturasi, jumlah mmf yang tidak proporsional diperlukan untuk menghasilkan fluks magnetik. Ini berarti bahwa arus pada kumparan yang membangkitkan mmf sehingga menghasilkan fluks pada inti, secara tidak proporsional akan naik melebihi dua kali puncak normalnya.



**Gambar 2.3** Kurva Tegangan, Flux, dan Arus Ketika Diberi Tegangan dengan Sudut  $0^\circ$  pada Operasi Awal Dimulai [3]

Ketika transformator diputuskan dengan sumber tegangan AC, sejumlah fluks sisa berada dalam inti karena sifat dari bahan magnetik. Sisa fluks dapat sebanyak 50 % sampai 90 % dari nilai maksimum fluks saat operasi, dan fluks sisa ini juga dipengaruhi oleh jenis inti transformator yang digunakan. Ketika sumber tegangan AC dihubungkan lagi dengan transformator, fluks yang dihasilkan

didasarkan fluks sisa yang sebelumnya sudah ada pada inti. Untuk mempertahankan tingkatan nilai fluks pada inti, yang sebaiknya berada pada kondisi saturasi. Transformator dapat menarik arus yang nilainya lebih besar dari arus beban penuh.

Berdasarkan desain tranformator, magnitudo arus inrush dapat mencapai 3,5 – 40 kali dari nilai arus saat beban penuh. Gelombang arus inrush mirip seperti gelombang sinusoida tetapi sebagian besar condong ke arah negatif atau positif.

### 2.1.2 Nilai Arus Inrush [1]

Jika  $r_p$  dan  $L_p$  merepresentasikan resistansi dan reaktansi pada belitan primer,  $L_m$  menggambarkan induktansi nonlinier dari inti besis sebagai fungsi dari arus magnetisasi. Kemudian  $r_{sp}$  dan  $L_{sp}$  mewakili resistansi dan reaktansi sisi sekunder ditinjau dari sisi primer transformator,  $V_p$  dan  $V_s$  merepresentasikan tegangan fasa ke tanah pada sisi primer dan sisi sekunder. Sehingga didapatkan persamaan berikut:

$$V_p = V_m \sin(\omega t + \theta_0) = i_\phi r_p + N_1 d\Phi_L/dt \quad (2.1)$$

Dimana  $\theta_0$  adalah beda fasa dari tegangan primer pada saat  $t=0$ . Dan  $i_\phi$  representasi dari arus magnetisasi. Lalu  $\Phi_L$  adalah jumlah fluks pada inti besi dan  $N_1$  adalah jumlah lilitan pada sisi primer transformator.

Oleh karena itu didapatkan :

$$V_m \sin(\omega t + \theta_0) = N_1 \Phi_L r_p / L_1 + N_1 d\Phi_L/dt \quad (2.2)$$

Dimana  $L_1$  adalah induktansi primer. Setelah menyelesaikan persamaan 2.22, maka untuk  $\Phi_L$  didapatkan dengan persamaan 2.23 :

$$\Phi_t = (\Phi_m \cos \theta_0 \pm \Phi_r) e^{\frac{r_p t}{L_1}} - \Phi_m \cos(\omega t + \theta_0) \quad (2.3)$$

Dimana  $\Phi_m$  adalah nilai maksimum dari fluks pada inti dan  $\Phi_r$  adalah fluks sisa. Dengan  $\theta_0 = \pi/2$  pada persamaan 2.23 didapatkan:

$$\Phi_t = \pm \Phi_r e^{\frac{r_p t}{L_1}} + \Phi_m \sin \omega t \quad (2.4)$$

Pada kasus ini, keberadaan fluks transient dengan magnitudo fluks sisa  $\Phi_r$  dan time constant  $\tau = L_1/r_p$ , nilai maksimum dari arus magnetisasi didapatkan sebagai berikut:

$$i_{\Phi_m} = \frac{2\Phi_m + \Phi_r - 2.22A_i}{\mu_0 A_t} \quad (2.5)$$

Dimana  $A_i$  adalah luas inti,  $A_t$  adalah luas dari inti dan belitan dan  $\mu_0$  adalah permeabilitas udara.

### **2.1.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Arus Inrush**

Posisi gelombang tegangan pada permulaan sumber tegangan bolak-balik dihubungkan dengan transformator menentukan nilai arus inrush. Jika kondisi gelombang tegangan tepat berada pada nilai nol pada saat transformator ter-energize, maka akan menghasilkan nilai arus inrush paling tinggi diantara kemungkinan kondisi lain. [6]

Kapasitas sumber tegangan bolak-balik dan daya transformator juga merupakan faktor yang mempengaruhi arus inrush. Semakin besar kapasitas sumber tegangan, semakin besar pula nilai arus inrush. Semakin besar kapasitas daya transformator, maka semakin kecil perbandingan arus inrush dan arus normal. Durasi arus inrush (waktu yang dibutuhkan untuk mencapai steady state) semakin besar untuk transformator dengan kapasitas daya lebih besar. [7]

Impedansi rangkaian meliputi impedansi internal sumber tegangan, saluran transmisi dan transformator. Semakin kecil impedansi rangkaian, semakin besar nilai arus inrush. Fluks sisa pada inti transformator menentukan juga nilai arus inrush yang dihasilkan. Semakin besar fluks sisa pada inti dan jika polaritasnya sama dengan posisi gelombang tegangan pada permulaan sumber tegangan terhubung dengan transformator, maka semakin besar arus inrush yang dihasilkan. Jika fluks sisa memiliki polaritas berlawanan dengan posisi gelombang tegangan sumber, maka fluks magnetik yang ditimbulkan karena proses starting tersebut akan berkurang oleh fluks sisa. [8]

Pada transformator ideal, arus magnetisasi akan naik menuju kira-kira dua kali dari puncak arus normalnya. Kemudian mmf dibangkitkan untuk menghasilkan fluks yang lebih besar dari normal. Bagaimanapun, transformator tidak dirancang dengan batas yang cukup diantara nilai puncak fluks normal dan batas saturasi, untuk mencegah saturasi pada kondisi seperti ini. Sehingga, inti transformator akan mencapai kondisi saturasi pada separuh cycle pertama gelombang tegangan. Selama saturasi, jumlah mmf yang tidak proporsional dibutuhkan untuk membangkitkan fluks magnetik. Hal ini berarti bahwa arus belitan yang menghasilkan mmf akan meningkat secara tidak proporsional menuju nilai yang melebihi dua kali nilai puncak

normalnya. Pada kasus ini, kondisi saturasi berkaitan dengan karakteristik nonlinier transformator. [8]

#### **2.1.4 Efek yang Ditimbulkan Arus Inrush [1]**

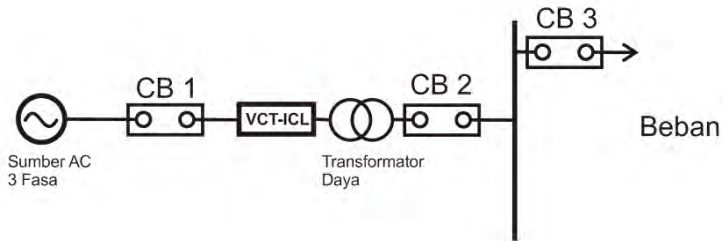
Arus inrush yang dihasilkan pada transformator daya dapat menimbulkan dampak-dampak, antara lain:

- a) Kegagalan operasi sistem proteksi transformator  
Nilai arus inrush dapat mendekati nilai arus hubung singkat. Sistem proteksi yang tak mampu mengantisipasi kondisi ini, akan menganggap arus inrush sebagai arus hubung singkat dan selanjutnya akan melakukan prosedur pemutusan rangkaian (*trip*). Jika kondisi ini tidak diantisipasi, akan mengganggu kinerja dari sistem tenaga listrik tersebut.
- b) Penurunan kualitas isolasi transformator  
Jika belitan transformator sering dilewati arus inrush, maka akan mengalami tekanan suhu, mekanis dan elektrik yang cukup tinggi. Jika kondisi ini tidak diantisipasi, kualitas isolasi belitan akan mengalami penurunan kualitas. Secara langsung, hal ini akan menurunkan lifecycle dari transformator tersebut.
- c) Penurunan kualitas daya dari sistem  
Bentuk arus inrush tidak sunisodal, arus inrush mempunyai kandungan harmonisa ke-1 dan ke-2 yang tinggi. Pada kasus arus inrush yang timbul pada transformator yang telah berbeban, kondisi tersebut akan menyebabkan gangguan pada beban-beban yang terhubung dengan transformator. Seperti yang diketahui bahwa harmonisa dapat menyebabkan distorsi tegangan dan resonansi dalam sistem tenaga listrik.

#### **2.2 VCT-ICL (Voltage Compensation Type – Inrush Current Limiter) [2]**

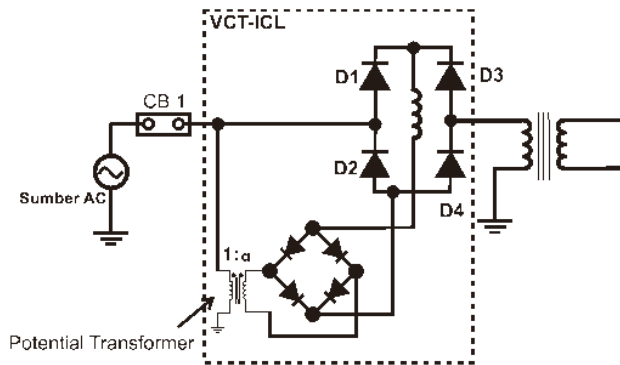
Arus *inrush* akibat energisasi transformator adalah salah satu fenomena dalam sistem tenaga listrik yang cukup mengganggu. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, beberapa metode untuk membatasi arus *inrush* telah ditawarkan. Salah satunya adalah dengan metode pemasangan komponen VCT-ICL (*Voltage Compensation Type – Inrush Current Limiter*). VCT-ICL sebenarnya adalah *DC reactor* sebagai pembatas arus *inrush* yang dimodifikasi dengan menambahkan VCT secara seri.

Kebanyakan transformator daya pada sistem distribusi menggunakan sistem 3 fasa. Pemasangan VCT-ICL pada sistem 3 fasa adalah dengan mensisipkannya pada tiap fasa, dan diletakkan diantara sumber 3 fasa dan transformator daya. Penempatan transformator dapat dilihat pada gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Skema Penempatan Pemasangan VCT-ICL

Komponen-komponen utama dari VCT-ICL adalah *DC reactor*, jembatan penyearah, dan sumber kompensasi tegangan DC (VCT). Output sumber kompensasi tegangan DC berupa tegangan DC *fullwave*.



**Gambar 2.5** Konfigurasi Rangkaian VCT-ICL

Komponen-komponen yang dipakai pada sumber kompensasi tegangan DC adalah *potential transformer (PT)* dan jembatan penyearah *fullwave*. Konfigurasi rangkaian VCT-ICL dapat dilihat pada gambar 2.5.

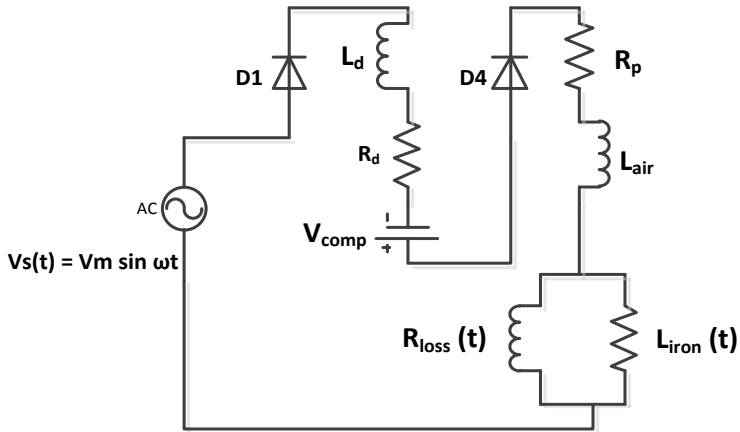
### 2.2.1 Prinsip Operasi [2]



Menurut sifat *charging* dan *discharging* dari *DC reactor*, maka operasi dari VCT-ICL dibagi menjadi 3 keadaan, yaitu keadaan *restricted*, keadaan *freewheeling*, dan keadaan *steady state*.

### 2.2.1.1 Keadaan *Restricted* [2]

Ketika transformator *ter-energize*, inti besi akan berubah dari keadaan non saturasi ke keadaan saturasi. Oleh karena itu, arus pada terminal yang menuju transformator akan naik dengan cepat. Kemudian pasangan dioda akan terkonduksi dan aliran arus akan melewati *DC reactor*  $L_d$ . Karena aliran arus melewati *DC reactor*, maka magnitudo dari arus *inrush* secara efektif akan ditahan. Rangkaian ekuivalen yang menggambarkan keadaan *restricted* dapat dilihat pada gambar 2.6.



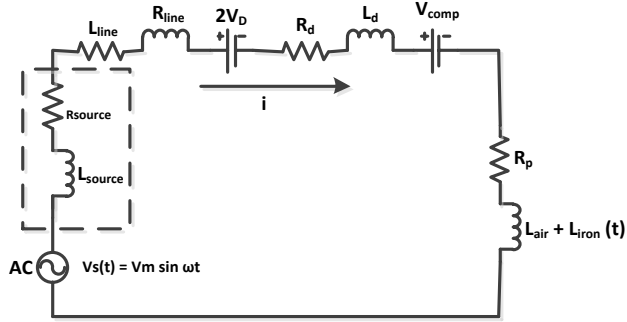
**Gambar 2.6** Rangkaian Saat Keadaan *Restricted*

$R_d$  merepresentasikan resistansi pada *DC reactor*. Dan  $V_{comp}$  adalah sumber kompensasi tegangan DC.

Ketika transformator *ter-energize* pada saat  $t=t_0$ , arus terminal sama dengan arus pada *DC reactor* ( $i_d$ ), dan nilai untuk induktansi magnetisasi adalah  $L_{NS}$  ( antara  $t_0$  dan  $t_1$ ). Representasi  $L_{NS}$  bisa dijelaskan sebagai berikut:

$$L_{air} + L_{iron} = \begin{cases} L_s & \text{Inti besi tersaturasi} \\ L_{NS} & \text{Inti besi tak tersaturasi} \end{cases} \quad (2.6)$$

Rangkaian ekuivalen pada keadaan *restricted* diilustrasikan pada gambar 3.8.



**Gambar 2.7** Rangkaian Ekuivalen Saat Keadaan *Restricted*

Dari gambar 2.7, didapatkan persamaan:

$$R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} = V_m \sin \omega t + V_{comp} - 2V_D \quad (2.7)$$

Dimana,

$$R_1 = R_{source} + R_{line} + R_d + R_p \quad (2.8)$$

$$L_1 = L_{source} + L_{line} + L_d + L_{NS} \quad (2.9)$$

$$V_{comp} = 2\alpha V_m / \pi ; \alpha : \text{rasio potential transformer} \quad (2.10)$$

Dimana  $V_d$  adalah tegangan *forward bias* dari dioda. Saat nilai  $i(t_0) = i_d(t_0) = 0$ , maka arus sesaat pada terminal dapat ditentukan dengan persamaan :

$$i(t) = \frac{V_m}{Z_1} \sin(\omega t - \varphi_1) + \frac{V_{comp} - 2V_D}{R_1} - \left[ \frac{V_m}{Z_1} \sin(\omega t_0 - \varphi_1) + \frac{V_{comp} - 2V_D}{R_1} \right] e^{-\left(\frac{R_1}{L_1}\right)(t-t_0)} \quad (2.11)$$

Dimana,

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2} \quad (2.12)$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_1}{R_1}\right) \quad (2.13)$$

Kemudian saat transformator mulai berubah ke keadaan saturasi pada  $t=t_1$ , nilai induktansi magnetisasi berubah dari  $L_{NS}$  menjadi  $L_N$ . Sehingga persamaan rangkaiannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$R_1 i + L_2 \frac{di}{dt} = V_m \sin \omega t + V_{comp} - 2V_D \quad (2.14)$$

Dimana,

$$L_2 = L_{source} + L_{line} + L_d + L_s \quad (2.15)$$

Saat nilai  $i(t_1) = i_d(t_1) = I_1$ , maka arus sesaat pada terminal dapat ditentukan dengan persamaan :

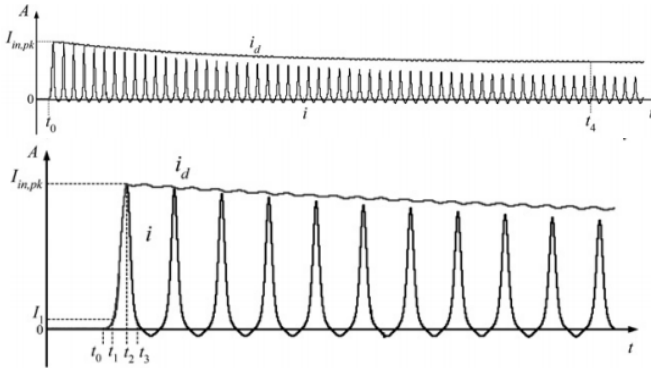
$$i(t) = \frac{V_m}{Z_2} \sin(\omega t - \varphi_2) + \frac{V_{comp} - 2V_D}{R_1} + \left[ I_1 - \frac{V_m}{Z_2} \sin(\omega t_1 - \varphi_2) + \frac{V_{comp} - 2V_D}{R_1} \right] e^{-\left(\frac{R_1}{L_2}\right)(t-t_1)} \quad (2.16)$$

Dimana,

$$Z_2 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_2)^2} \quad (2.17)$$

$$\varphi_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_2}{R_1}\right) \quad (2.18)$$

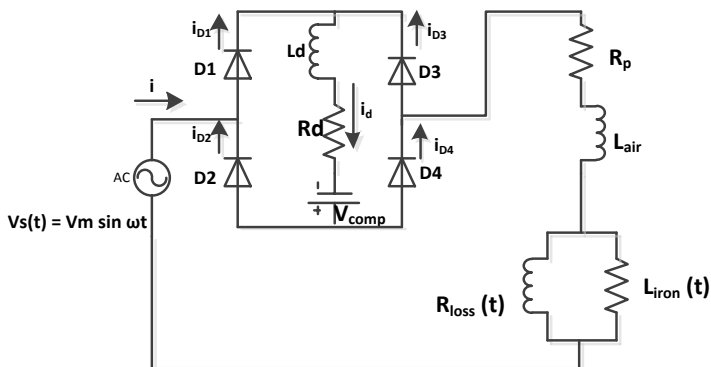
Untuk mengetahui posisi waktu  $t$  pada penjelasan sebelumnya, dapat dilihat pada gambar 2.8.



**Gambar 2.8** Kurva Arus Terminal dan Arus Pada DC Reactor [2]

### 2.2.1.2 Keadaan *Freewheeling* [2]

Setelah menahan magnitudo arus *inrush*, kemudian *DC reactor* akan melepas energi yang tersimpan pada saat keadaan *restricted*, lalu semua dioda penyearah terkonduksi secara simultan. Selama keadaan *freewheeling*, tegangan antara 2 teminal pada VCT-ICL mendekati nol. Ini artinya VCT-ICL bereaksi seperti *short circuit* dan transformator seperti langsung terhubung dengan sumber tegangan AC. Rangkaian ekuivalen pada saat keadaan *freewheeling* dapat diilustrasikan seperti pada gambar 2.9.



**Gambar 2.9** Rangkaian Saat Keadaan *Freewheeling*

Keadaan *freewheeling* terjadi pada saat  $t_2 \leq t \leq t_4$  (dapat dilihat pada gambar 2.9). Inti besi transformator masih pada keadaan saturasi saat  $t_2 \leq t \leq t_3$  (dapat dilihat pada gambar 2.9), sehingga pada periode ini, persamaan rangkaian dapat dituliskan:

$$R_2 i + L_3 \frac{di}{dt} = V_m \sin \omega t \quad (2.19)$$

Dimana,

$$R_2 = R_{\text{source}} + R_{\text{line}} + R_p \quad (2.20)$$

$$L_3 = L_{\text{source}} + L_{\text{line}} + L_s \quad (2.21)$$

Kemudian persamaan untuk menghitung arus sesaat pada periode ini adalah sebagai berikut:

$$i(t) = \frac{V_m}{Z_3} \sin(\omega t - \varphi_3) \quad (2.22)$$

Dimana,

$$Z_3 = \sqrt{R_2^2 + (\omega L_3)^2} \quad (2.23)$$

$$\varphi_3 = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_3}{R_2}\right) \quad (2.24)$$

Pada saat  $t=t_3$  inti besi mulai berubah ke keadaan non-saturasi, sehingga nilai induktansi magnetisasi berubah dari  $L_S$  menjadi  $L_{NS}$ . Persamaan arus pada *DC reactor* pada keadaan ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$i_d(t) = \frac{V_{comp} - 2V_D}{R_D} + \left(I_{in,pk} - \frac{V_{comp} - 2V_D}{R_d}\right)e^{-\left(\frac{R_d}{L_d}\right)(t-t_2)} \quad (2.25)$$

Magnitudo arus pada *DC reactor* lebih besar daripada puncak dari arus pada terminal selama keadaan ini. Lalu *DC reactor* melepaskan energi dan semua dioda penyearah aktif. Arus untuk masing-masing dioda dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} i_{D1} = i_{D4} &= \frac{i_d + i}{2} \\ i_{D2} = i_{D3} &= \frac{i_d - i}{2} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Ketika energi yang tersimpan pada *DC reactor* habis, ini artinya operasi akan mulai ke keadaan *steady state*.

### 2.2.1.3 Keadaan Steady State [2]

Pada keadaan *steady state*, VCT-ICL masih bereaksi seperti *short circuit*. Rangkaian pada keadaan ini diilustrasikan pada gambar 3.10. Dan  $I_d$  dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$i_d(t_4) = I_d = \frac{V_{comp} - 2V_D}{R_D} \quad (2.27)$$

Dimana  $I_d$  adalah arus rata-rata pada *DC reactor* saat keadaan *steady state*. Ketika beban dihubungkan pada sisi sekunder transformator, untuk menyesuaikan magnitudo  $V_{comp}$  maka  $i_d$  lebih besar atau sama dengan puncak arus terminal. Sehingga hampir tidak ada distorsi pada kurva tegangan dan arus saat *steady state*. Ketiadaan distorsi ini karena kondisi berikut yang terpenuhi, yaitu:

$$\frac{V_{\text{comp}} - 2V_D}{R_d} \geq i_{\text{max}} \quad (2.28)$$

Dimana  $i_{\text{max}}$  adalah nilai puncak dari arus terminal saat *steady state*.

### 2.2.2 Evaluasi DC Reactor [2]

Nilai induktansi *DC reactor* yang diinginkan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut, dengan interval waktu dari  $t_0$  sampai  $t_2$ .

$$R_1 i + L_2 \frac{di}{dt} = V_{\text{dc}} + V_{\text{comp}} - 2V_D \quad (2.29)$$

Dimana,

$$V_{\text{dc}} = 2V_m/\pi \quad (2.30)$$

Karena  $I_{\text{in,pk}}$  muncul pada saat  $t=t_2$ , induktansi dari  $L_d$  dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$L_A = L_{\text{source}} + L_{\text{line}} + L_s \quad (2.31)$$

$$L_B = L_{\text{source}} + L_{\text{line}} + L_{\text{air}} \quad (2.32)$$

$$L_d = \frac{R_1(t_2 - t_0)}{\ln[(V_{\text{dc}} + V_{\text{comp}} - 2V_D)/(V_{\text{dc}} + V_{\text{comp}} - 2V_D - R_1 I_{\text{in,pk}})]} - L_A \quad (2.33)$$

$$L_d \cong \frac{R_1/4f}{\ln[(V_{\text{dc}} + V_{\text{comp}} - 2V_D)/(V_{\text{dc}} + V_{\text{comp}} - 2V_D - R_1 I_{\text{in,pk}})]} - L_B \quad (2.34)$$

### 2.3 Harmonisa [9]

Harmonisa adalah distorsi periodik dari gelombang sinus tegangan, arus atau daya dengan bentuk gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan di luar bilangan satu terhadap frekuensi fundamental (frekuensi 50 Hz atau 60 Hz). Nilai frekuensi dari gelombang harmonisa yang terbentuk merupakan hasil kali antara frekuensi fundamental dengan bilangan harmonisanya ( $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ , dst). Bentuk gelombang yang terdistorsi merupakan penjumlahan dari gelombang fundamental dan gelombang harmonisa ( $h_1$ ,  $h_2$ , dan seterusnya) pada frekuensi kelipatannya. Semakin banyak gelombang harmonisa yang diikutsertakan pada gelombang fundamentalnya, maka gelombang akan semakin mendekati gelombang persegi atau gelombang akan berbentuk

non sinusoidal. Gambar 2.10 adalah contoh gelombang fundamental beserta harmonisanya



**Gambar 2.10** Gelombang Fundamental Dengan Gelombang Harmonisanya [9]

Harmonisa pada jaringan yang ditimbulkan oleh konsumen akan menimbulkan arus urutan. Efek dari arus urutan nol adalah adanya arus residu yang akan mengalir pada titik netral (trafo atau generator). Sementara arus negatif akan menimbulkan flux balik di stator generator dan belitan medan, dimana efeknya akan sangat membahayakan belitan tersebut. Oleh sebab itu PLN (sisi sumber) menginginkan harmonisa yang ditimbulkan konsumen harus serendah mungkin.

### 2.3.1 *Total Harmonic Distortion* [9]

*Total Harmonic Distortion* (THD) merupakan nilai prosentase antara total komponen harmonisa dengan komponen fundamentalnya. Semakin besar prosentase THD ini menyebabkan semakin besarnya resiko kerusakan peralatan akibat harmonisa yang terjadi pada arus maupun tegangan. Nilai THD yang diijinkan secara internasional maksimal berkisar 5% dari tegangan atau arus frekuensi fundamentalnya.

Untuk mencari nilai THD dari tegangan dapat digunakan persamaan:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (2.35)$$

Sedangkan untuk mencari nilai THD dari arus dapat digunakan persamaan:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (2.36)$$

Kualitas tegangan ditentukan oleh sumber sedangkan kualitas arus ditentukan oleh beban. Sumber biasanya telah dirancang supaya tegangannya mendekati sinusoidal murni sehingga nilai THD tegangan yang diijinkan jauh lebih kecil dibanding THD arusnya. Berbicara mengenai bahaya yang akan timbul, yang menentukan pemanasan lebih pada peralatan adalah harmonisa arus. Tetapi harmonisa tegangan yang besar juga merupakan indikasi harmonisa arus yang terlalu besar, karena sumber tegangan yang biasanya dirancang sinusoidal.



**Halaman ini sengaja dikosongkan**

### BAB III

## PEMODELAN TRANSFORMATOR DAYA 150 KV GI KENJERAN DAN DENGAN PEMASANGAN VCT-ICL

### 3.1 Profil Transformator Daya Gardu Induk Kenjeran 150 KV [10]

Gardu Induk Kenjeran mempunyai transformator daya 150/20 KV. Transformator tersebut mempunyai nilai parameter yang identik. Berikut adalah data *nameplate* transformator tersebut:

Transformator daya pertama:

Merk	: ALSTOM
Tipe	: TTH
Nomer seri	: 51146/004
Daya	: 50 MVA
Tahun Operasi	: 1998
Rating tegangan	: 150 / 20 KV
Arus output nominal	: 192 / 1443 A
Impedansi	: 9.3 %
Vektor group	: YynO(d)
Jenis pendingin	: ONAN/ONAF/OFAF

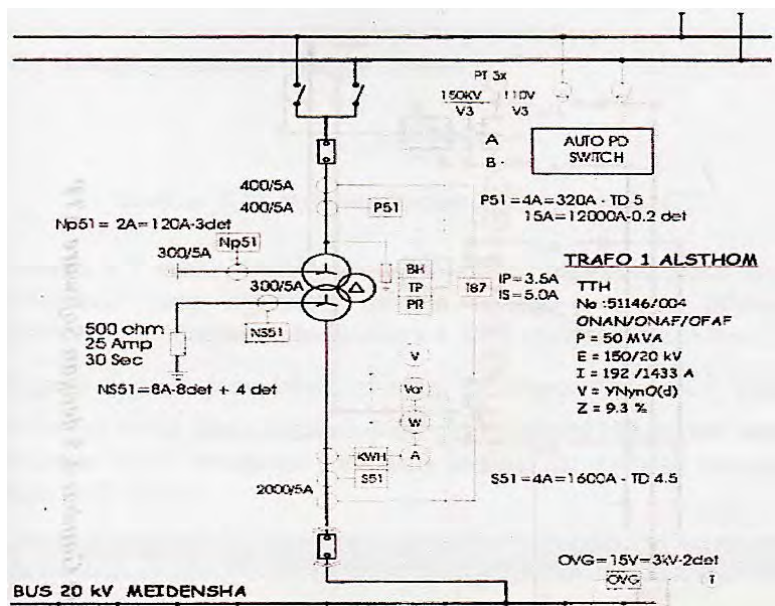


**Gambar 3.1** Transformator Daya 150 KV di GI Kenjeran [10]

Pada gambar 3.1 menampilkan foto transformator daya 150 KV yang berada di Gardu Induk Kenjeran, Surabaya.

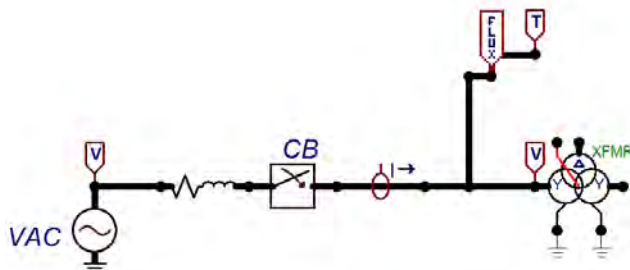
### 3.2 Pemodelan Eksisting Tanpa VCT-ICL

Transformator daya yang dipakai untuk pemodelan adalah salah satu transformator daya di GI kenjeran 150 KV. Skema yang akan dimodelkan pada ATP dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Single Line Diagram Salah Satu Transformator [10]

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* ATP, dan *Single Line Diagram* yang telah dimodelkan menggunakan ATP dapat dilihat pada gambar 3.3. Hasil pemodelan tidak memperhitungkan kapasitansi transformator, namun hanya nonlinier induktansi inti besi. Karena nonlinier induktansi inti besi mempengaruhi arus *inrush* yang dihasilkan.



**Gambar 3.3** Pemodelan *Single Line Diagram* Gambar 3.2  
Dengan Program Simulasi ATP

Hasil pemodelan pada gambar 3.3 tersusun dari beberapa komponen penyusunnya. Diskripsi masing-masing komponen tersebut dapat dilihat pada tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Komponen-Komponen Penyusun  
pada Pemodelan

NO	GAMBAR KOMPONEN	KETERANGAN
1		Sebagai tegangan sumber
2		Sebagai Saluran Transmisi Antara Sumber Tegangan dan <i>Breaker</i>
3		Sebagai <i>Circuit Breaker</i>
4		Sebagai Transformator Daya
5		Sebagai alat ukur arus dan tegangan

Berikut penjelasan dari komponen-komponen penyusun pemodelan pada gambar 3.3.

#### 1) Tegangan Sumber

Pada tabel 3.1 nomor 1 menunjukkan komponen sumber tegangan pada software ATP. Besar nilai sumber tegangan 3 fasa yang digunakan

pada pemodelan ini adalah tegangan  $\frac{150x\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$  KV dengan frekuensi 50 Hz. Selengkapnya data sumber tegangan dapat dilihat pada tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Data Pemodelan Sumber Tegangan

DATA	UNIT	VALUE
Amplitude	Volt	122474
f	Hz	50
Pha	Deg	-90
Tstart	s	-1
Tstop	s	20

Tstart pada tabel 3.2 merepresentasikan waktu saat sumber tegangan mulai aktif, sedangkan Tstop waktu saat sumber tegangan mati. Data “Pha” adalah data yang menjelaskan berapa derajat fasa sumber tegangan saat sumber tegangan mulai aktif.

## 2) Sebagai Pemodelan Saluran Antara Sumber Tegangan dan *Breaker*

Pada tabel 3.1 nomor 2 menunjukkan pemodelan saluran antara sumber tegangan dan *breaker*. Pemodelan saluran menggunakan komponen RLC 3 fasa pada *software* ATP. Data mengenai pemodelan saluran ini dapat dilihat pada tabel 3.3.

**Tabel 3.3** Data Pemodelan Saluran

DATA	UNIT	VALUE
R	ohms	3
L	mH	10
C	μF	0

Pengisian yang perlu diperhatikan adalah nilai R dan L. Untuk R diisi nilai 3 ohm, sedangkan untuk L diisi nilai 10 mH.

## 3) Pemodelan Sebagai *Circuit Breaker*

Pada tabel 3.1 nomor 3 menunjukkan pemodelan *circuit breaker*. Data *circuit breaker* pada pemodelan ini hanya memperhatikan waktu

CB *close* dan waktu CB *open*. Selengkapnya mengenai data CB dapat dilihat pada tabel 3.4.

**Tabel 3.4** Data *Circuit Breaker*

DATA	UNIT	VALUE
T <sub>cl 1</sub>	s	0
T <sub>op 1</sub>	s	20
T <sub>cl 2</sub>	s	0
T <sub>op 2</sub>	s	20
T <sub>cl 3</sub>	s	0
T <sub>op 3</sub>	s	20

Pada tabel ac, terdapat data T<sub>cl</sub> dan T<sub>op</sub> yang masing-masing artinya adalah data waktu saat CB *close* dan CB *open*. Untuk setting waktu tersebut untuk masing-masing fasa 1, fasa 2 dan fasa 3 adalah sama.

#### 4) Pemodelan Sebagai Transformator Daya

Pemodelan untuk transformator daya menggunakan komponen XFMR pada ATP seperti terlihat pada tabel 3.1 nomor 4. Komponen ini dapat digunakan untuk memodelkan transformator daya tegangan tinggi, tanpa membuat kurva magnetisasi secara manual.

Data mengenai parameter transformator daya yang akan dimodelkan dapat dilihat pada tabel 3.5 dan tabel 3.6. Data-data transformator yang perlu diperhatikan adalah daya transformator dan tegangan pada sisi primer dan sekunder. Data pada pemodelan transformator disesuaikan dengan data *nameplate* dan *report test* transformator GI kenjeran.

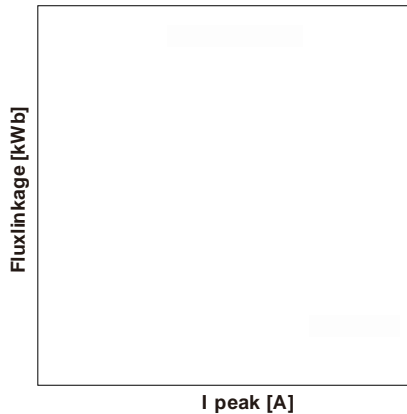
**Tabel 3.5** Data *Nameplate* Transformator

<b>Primer</b>	L-L Voltage (KV)	150
	Power (MVA)	50
<b>Sekunder</b>	L-L Voltage (KV)	20
	Power (MVA)	50
<b>Tersier</b>	L-L Voltage (KV)	10
	Power (MVA)	16

**Tabel 3.6** Data *Report test*  
Transformator

<b>P-S</b>	Imp(%)	9,3
	Pow(MVA)	50
	Loss(Kw)	22,8
<b>P-T</b>	Imp(%)	18,7
	Pow(MVA)	50
	Loss(Kw)	4,38
<b>S-T</b>	Imp(%)	8,5
	Pow(MVA)	50
	Loss(Kw)	3,58

Tipe inti besi yang digunakan pada pemodelan adalah “3-leg stacked” dengan kurva magnetisasi inti besi transformator daya dapat dilihat pada gambar 3.4.



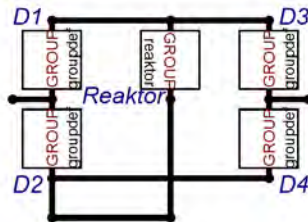
**Gambar 3.4** Pemodelan Kurva  
Magnetisasi Inti Besi

5) Sebagai Alat Pengukuran

Alat pengukuran yang dibutuhkan adalah *ampere meter* dan *volt meter*. Pada tabel 3.1 nomor 5 memperlihatkan kedua komponen tersebut pada *software* ATP.

### 3.3 Pemodelan Eksisting dengan Pemasangan ICL (DC Reator)

Lokasi ICL (*DC Reactor*) seperti yang telah dibahas pada BAB 2, akan dipasangkan diantara CB dan transformator daya. Komponen-komponen yang tersusun pada ICL adalah komponen induktor polaritas, resistor dan 4 diode sebagai penyearah arus dan tegangan.

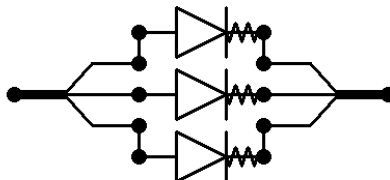


**Gambar 3.5** Pemodelan *DC Reactor* Dengan Program Simulasi ATP

Gambar 3.5 adalah pemodelan ICL (*DC Reactor*) pada ATP. Pada gambar pemodelan ICL terdapat 5 komponen grup yaitu reaktor, D1, D2, D3, dan D4. Komponen grup memiliki komponen-komponen penyusun. Dengan alasan keringkasan dimensi, maka komponen penyusun dikelompokkan menjadi sebuah grup. Selanjutnya akan dibahas tentang masing-masing grup penyusun ICL dan komponen penyusun grup itu sendiri.

#### 3.3.1 Komponen Grup D1, D2, D3, dan D4

Parameter-parameter dan komponen penyusun D1, D2, D3, dan D4 adalah sama, yaitu tersusun dari 3 diode 1 fasa dengan resistansi dalam yang sama. Gambar 3.6 menampilkan susunan komponen grupnya .



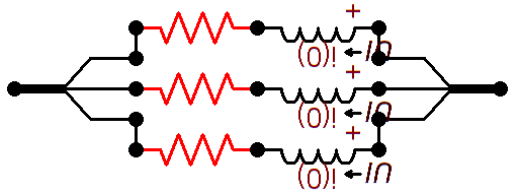
**Gambar 3.6** Pemodelan Dioda Penyearah *DC Reactor* Dengan Program Simulasi ATP



Resistansi dalam komponen grup D1, D2, D3, dan D4 adalah sama dengan nilai sebesar 5 ohm. Nilai resistansi tersebut merepresentasikan parameter  $R_{\text{dioda}}$

### 3.3.2 Komponen Reaktor

Pemodelan komponen reaktor tersusun dari induktor polaritas dan resistor. Untuk lebih jelasnya mengenai susunan komponen dapat dilihat pada gambar 3.7.



**Gambar 3.7** Pemodelan Reaktor Dengan Program Simulasi ATP

Terlihat pada gambar 3.12, komponen reaktor tersusun dari 3 induktor polaritas 1 fasa dan 3 resistor. Nilai besaran induktansi dan resistansi pada komponen ini mempengaruhi pengurangan nilai arus inrush. Data nilai parameter reaktor dapat dilihat pada tabel 3.7

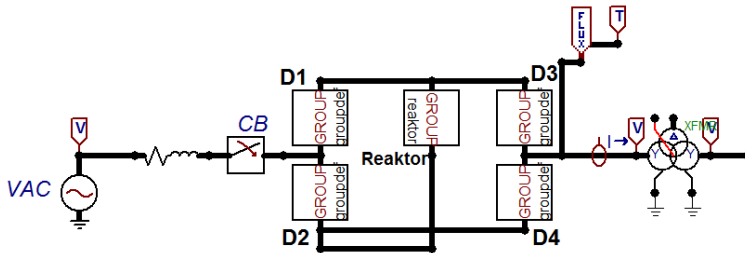
**Tabel 3.7** Data Parameter Reaktor

Data	Unit	Value
L	mH	1791,645
R	Ohm	0,01

Nilai R pada tabel 3.5 merepresentasikan nilai  $R_d$  dan nilai L pada tabel merepresentasikan nilai  $L_d$ .

### 3.3.3 Pemasangan ICL pada Eksisting

Pemodelan ICL yang telah dibahas sebelumnya, selanjutnya dipasangkan pada pemodelan eksisting yang telah dibahas pada BAB 2. gambar 3.8 memperlihatkan pemodelan eksisting setelah dipasang ICL pada *software* ATP.



**Gambar 3.8** Pemodelan *Single Line Diagram* Setelah Dipasang DC Reactor Dengan Program Simulasi ATP

### 3.4 Pemodelan Eksisting dengan Pemasangan VCT-ICL

VCT-ICL merupakan komponen ICL dengan ditambahkan VCT untuk memperbaiki kualitas tegangan sistem. Jadi pada subbab ini akan dibahas tentang pemodelan VCT dan bagaimana susunannya setelah terpasang ICL dan eksisting. Untuk nilai parameter ICL sama dengan pembahasan sebelumnya.

#### 3.4.1 Pemodelan VCT (*Voltage Compensation Type*)

Komponen VCT tersusun dari 2 komponen utama, yaitu *potential transformer* dan *full wave rectifier*. Gambar 3.9 menampilkan susunan komponen VCT setelah dimodelkan pada *software* ATP.

Parameter yang perlu diperhatikan pada VCT adalah nilai rasio *potential transformer*. Nilai rasio PT nantinya menentukan nilai  $V_{comp}$ . Seperti yang telah dibahas pada BAB 2, penentuan  $V_{comp}$  didapatkan melalui perhitungan dengan persamaan 2.28. dari persamaan 2.28, maka didapatkan persamaan 3.1. Berikut adalah perhitungannya:

$$V_{comp} \geq (i_{max} \times R_D) + 2V_D \quad (3.1)$$

$$V_D = 0 \text{ volt}$$

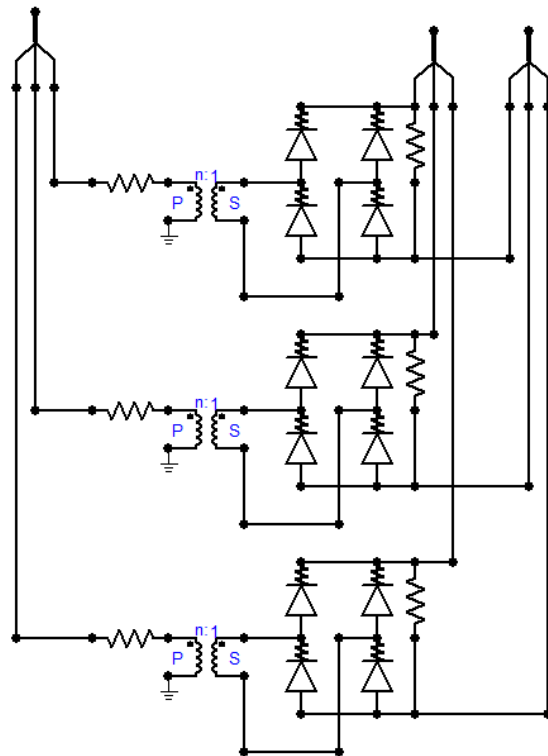
$$R_d = 0,01 \text{ ohm}$$

$$i_{max} = 192 \text{ A ( arus maksimal saat steady state, dan nilai didapatkan dari data transformator)}$$

$$V_{comp} \geq (i_{max} \times R_D) + 2V_D$$

$$V_{comp} \geq (192 \times 0,01) + 0$$

$$V_{comp} \geq 1,92 \text{ volt}$$



**Gambar 3.9** Pemodelan VCT Dengan Program Simulasi ATP

Jadi agar pemasangan komponen VCT menjadi efektif mengurangi distorsi, maka nilai  $V_{\text{comp}}$  harus lebih besar atau sama dengan 1,92 volt. Pada kasus ini misalnya rasio PT adalah 5000:1, dengan  $V_m$  adalah 122474 volt, maka didapatkan nilai  $V_{\text{comp}}$  adalah  $122474/5000 = 24,49$  volt. Berarti penggunaan nilai rasio PT 5000:1 memenuhi syarat persamaan 2.28 dan efektif bila digunakan.

Setelah rasio PT ditentukan, selanjutnya adalah menentukan nilai parameter komponen ICL (DC reactor). Parameter-parameter DC reactor adalah  $L_d$  dan  $R_d$ . Misalnya ditentukan nilai  $R_d$  adalah 0,01ohm, maka melalui persamaan 2.34, dapat ditentukan nilai  $L_d$ .

Parameter-parameter yang perlu diketahui untuk mendapatkan nilai  $L_d$  melalui persamaan 2.34 adalah  $V_{dc}$ ,  $V_{comp}$ ,  $V_D$ ,  $R_l$ ,  $I_{in,pk}$ ,  $L_{source}$ ,  $L_{line}$ , dan  $L_{air}$ . Berikut adalah perhitungannya:

$$\begin{aligned}
 R_{source} + R_{line} &= 3 \text{ ohm} \\
 V_m &= 122474 \text{ volt} \\
 V_{dc} &= 2V_m/\pi = (2 \times 122474)/3,14 = 78008,9172 \text{ volt} \\
 L_{source} + L_{line} &= 10 \text{ mH} \\
 R_d &= 0,01 \text{ ohm} \\
 2R_{dioda} &= 10 \text{ ohm} \\
 V_D &= 0 \text{ volt} \\
 V_{comp} &= 24,49 \text{ volt}
 \end{aligned}$$

Menentukan  $R_p$  dan  $L_{air}$  :

$$\begin{aligned}
 \%imp &= 9,3 \% \\
 P_{hs} &= 22,8 \text{ KW} \\
 I_{hs} &= I_{full \text{ load}} = 192 \text{ A} \\
 V_{imp} &= V \times \%imp = 150000 \times 9,3 = 13950 \text{ volt} \\
 Z &= V_{imp} / I_{full \text{ load}} = 13950/192 = 72,656 \text{ ohm} \\
 R &= P_{hs} / (I_{hs}^2) = 22800 / (192^2) = 0,618 \text{ ohm} \\
 R_p &= R/2 = 0,618 / 2 = 0,309 \text{ ohm} \\
 X &= \sqrt{72,656^2 - 0,618^2} = 72,653 \text{ ohm} \\
 L &= X / 2 \pi f = 72,653 / 2 \pi 50 = 0,231 \text{ H} \\
 L_{air} &= 0,1157 \text{ H} \\
 L_B &= L_{source} + L_{line} + L_{air} = 125,7 \text{ H}
 \end{aligned}$$

Menentukan  $R_l$

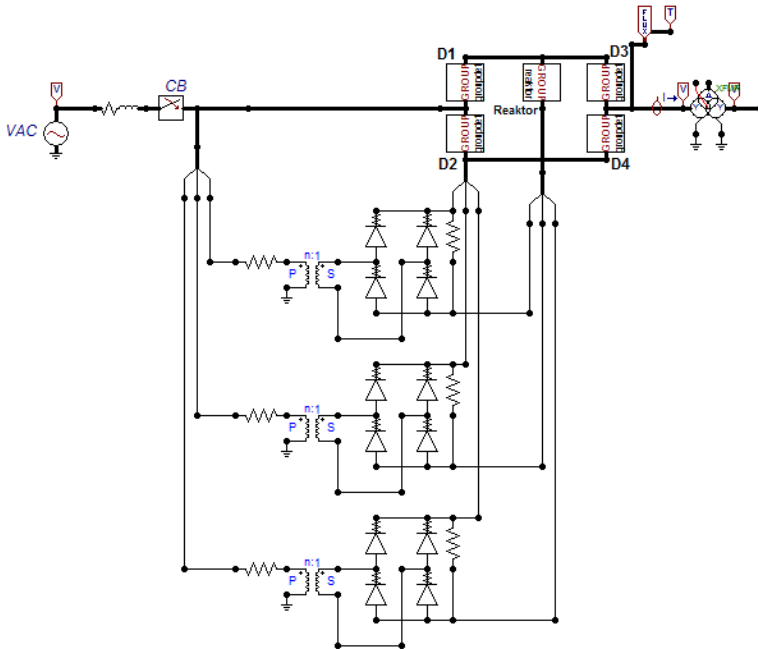
$$\begin{aligned}
 R_l &= R_{source} + R_{line} + R_d + 2R_{dioda} + R_p \\
 R_l &= 0 + 3 + 0,01 + 10 + 0,309 = 13,319 \text{ ohm}
 \end{aligned}$$

$I_{in,pk}$  adalah puncak arus inrush yang diharapkan, misalnya  $I_{in,pk} = 200 \text{ A}$ . jika mengacu pada persamaan 2.34, maka didapatkan nilai  $L_d$  adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 L_d &\cong \frac{\frac{13,1625}{4 \times 50}}{\ln[(78008,917 + 24,49 - 0)/(78008,917 + 24,49 - 0 - (13,319 \times 200))]} - 125,7 \\
 L_d &\cong 1791,645 \text{ mH}
 \end{aligned}$$

### 3.4.2 Pemasangan VCT-ICL pada Eksisting

Pemodelan VCT pada ATP seperti pada gambar selanjutnya dipasangkan pada ICL untuk kemudian dipasang pada eksisting. Gambar 3.10 menampilkan pemodelan eksisting setelah dipasang komponen VCT –ICL.



**Gambar 3.10** Pemodelan Dengan Program Simulasi ATP Setelah Pemasangan VCT-ICL

## **BAB IV**

### **ANALISA HASIL SIMULASI ARUS *INRUSH* TANPA DAN DENGAN METODE PEMASANGAN KOMPONEN VCT-ICL**

#### **4.1 Hasil Simulasi Arus *Inrush* Eksisting (Tanpa Pemasangan VCT-ICL)**

Kurva arus *inrush* hasil pemodelan eksisting ditampilkan pada gambar 4.1. dapat dilihat nilai arus *inrush* terbesar pada fasa 1. Nilai puncak arus *inrush* untuk masing-masing fasa adalah 2064 A (fasa 1), -788 A (fasa 2) dan -912,7 A (fasa 3). Berdasarkan nilai puncak arus *inrush*, nilai arus *inrush* pada fasa 1 paling besar diantara ketiga fasa.

Kurva tegangan terminal hasil simulasi pemodelan eksisting dapat dilihat pada gambar 4.4. Dari gambar 4.4, dapat dilihat bahwa posisi fasa 1 (berwarna merah), saat awal *energize* atau pada detik ke 0 berada pada posisi sudut  $0^0$ . Sedangkan untuk fasa lainnya mengikuti dengan beda sudut  $120^0$  tiap fasa.

Seperti yang telah dibahas pada BAB 2, arus *inrush* akan berada pada nilai tertinggi jika posisi tegangan sumber awal saat *energize* berada pada  $0^0$ . Hal ini yang mengakibatkan nilai puncak arus *inrush* yang paling besar antara ketiga fasa adalah fasa 1 dengan nilai puncak arus *inrush* adalah 2064 A.

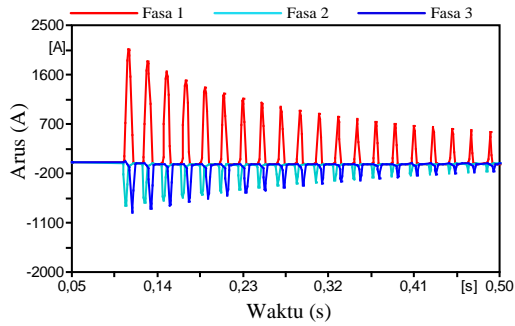
#### **4.2 Hasil Simulasi Setelah Dipasang ICL (*DC Reactor*)**

Dengan spesifikasi parameter ICL adalah seperti pada tabel 3.5, maka didapatkan kurva arus *inrush* seperti pada gambar 4.2. Nilai puncak arus *inrush* untuk masing-masing fasa adalah 171A (fasa 1), -60,1 A (fasa 2) dan -97,2 A (fasa 3). Nilai puncak arus *inrush* terbesar adalah pada fasa 1. Dan yang paling kecil adalah arus *inrush* pada fasa 2. Urutan terbesar dan terkecil setelah dipasangkan ICL pada eksisting sama dengan saat tanpa dipasang ICL. Selain itu polaritas nilai arus *inrush* juga sama dengan saat tanpa pemasangan ICL.

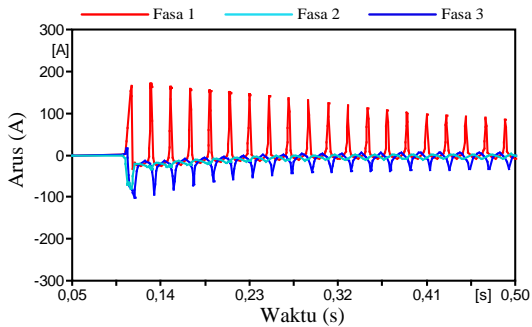
Pada gambar 4.4, dapat dilihat bentuk kurva tegangan terminal ketiga fasa setelah dipasangkan ICL pada eksisting. Kurva tegangan banyak terdapat distorsi, terutama pada periode-periode awal.

#### **4.3 Hasil simulasi Setelah Dipasang VCT-ICL**

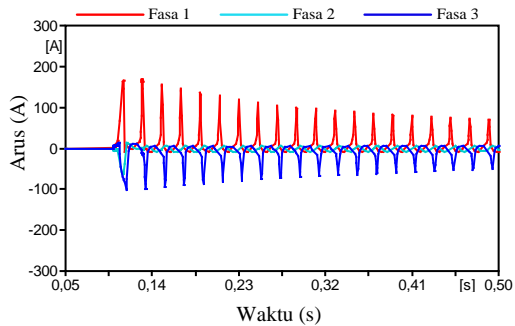
Setelah dipasang VCT dengan nilai rasio *Potential Transformer* adalah 5000:1, maka didapatkan kurva tegangan terminal seperti pada gambar 4.5.



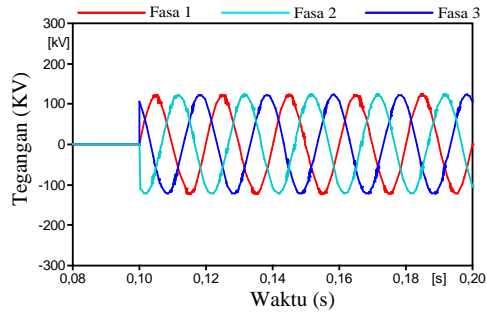
**Gambar 4.1** Kurva Arus *Inrush* 3 Fasa Sebelum Dipasang VCT-ICL



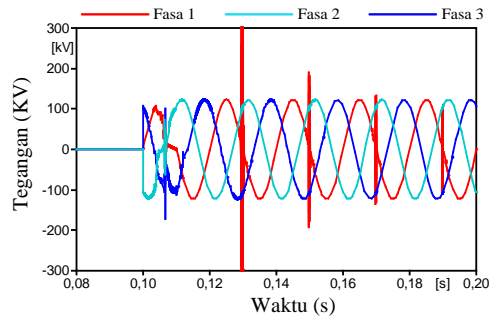
**Gambar 4.2** Kurva Arus *Inrush* 3 Fasa Setelah Dipasang ICL (DC Reactor)



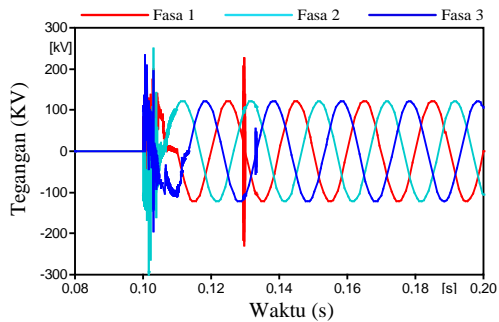
**Gambar 4.3** Kurva Arus *Inrush* 3 Fasa Setelah Dipasang VCT-ICL



**Gambar 4.4** Kurva Tegangan Terminal 3 Fasa Sebelum Dipasang VCT-ICL



**Gambar 4.5** Kurva Tegangan Terminal 3 Fasa Setelah Dipasang ICL (*DC Reactor*)

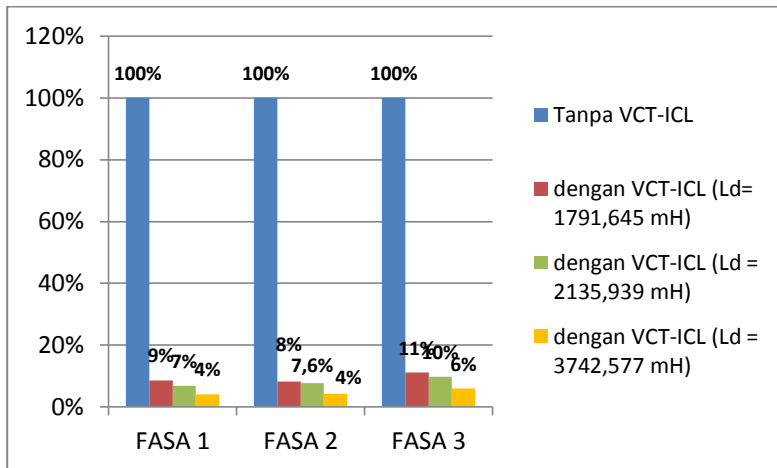


**Gambar 4.6** Kurva Tegangan Terminal 3 Fasa Setelah Dipasang VCT-ICL



Dapat dilihat pada gambar 4.5 dan 4.6 terdapat spike pada periode-periode awal. Hal ini dikarenakan karena terpasangnya DC reactor. sebagai imbasnya, maka spike pada gelombang tegangan akan timbul, namun hanya sesaat saja dan tidak pada steady state. Pada saat terpasang DC reactor, spike muncul pada periode yang lebih panjang daripada setelah dipasang VCT-ICL. Kemudian nampak pada gambar 4.6, terjadi pengurangan distorsi dari keadaan saat dipasang ICL tanpa VCT. Lebih jelasnya mengenai perbedaan bentuk kurva tegangan saat sebelum dipasang VCT-ICL, setelah dipasang ICL, dan setelah dipasang VCT-ICL dapat dilihat pada gambar 4.4, 4.5, dan 4.6. Pengurangan distorsi pada 2 periode awal tidak cukup signifikan, hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.6 bahwa masih terdapat distorsi pada 2 periode awal. Namun untuk periode selanjutnya sudah tidak nampak distorsi pada tegangan terminal, tepatnya fasa 1. Hal ini sekaligus membuktikan bahwa pemasangan VCT pada ICL efektif mengurangi distorsi, namun jika hanya persamaan 2.28 terpenuhi.

Arus *inrush* setelah dipasang VCT\_ICL besarnya tidak jauh berbeda dengan saat hanya dipasang ICL, karena parameter *DC reactor* yang sama. Kurva arus *inrush* setelah dipasang VCT-ICL pada eksisting dapat dilihat pada gambar 4.3. Nilai puncak arus *inrush* untuk masing-masing fasa adalah 178 A (fasa 1), -64,3 A (fasa 2) dan -101,13A (fasa 3).

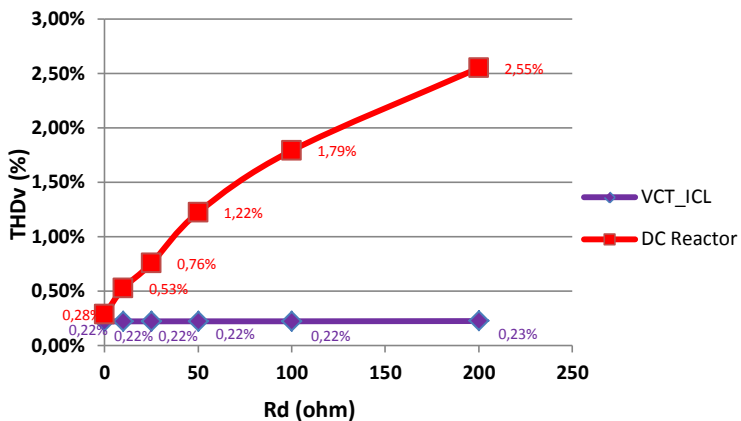


**Gambar 4.7** Prosentase Pengurangan Arus *Inrush* Berdasarkan Nilai  $L_d$

Gambar 4.7 menampilkan hasil pengurangan arus *inrush* dengan menggunakan VCT-ICL berdasarkan perubahan nilai  $L_d$ . Semakin besar impedansi reaktor, maka pengurangan arus *inrush* juga semakin besar. Hal itulah yang divisualisasikan pada gambar 4.7. Pada fasa 1 saja misalnya, dengan nilai  $L_d$  adalah 3742,557 mH, arus *inrush* berkurang hingga menjadi 4%. Sedangkan dengan  $L_d$  sama dengan 1791,645 mH, arus *inrush* berkurang hanya hingga menjadi 9%. Jadi penggunaan metode ini bisa dibilang cukup fleksibel untuk pengurangan arus *inrush* yang diinginkan.

#### 4.4 Perbandingan THDv Antara Saat Terpasang DC Reactor dan Terpasang VCT-ICL

Jika sisi sekunder transformator diberikan beban resistif 100 ohm, maka akan mengalir arus pada sisi sekunder transformator. Pada saat keadaan *steady state*, ada perbedaan bentuk gelombang tegangan antara saat terpasang DC reactor dan terpasang VCT-ICL. Timbulnya distorsi pada saat terpasang DC reactor pada gambar 4.5 berimbas pula pada saat *steady state*.



**Gambar 4.8** THDv saat menggunakan DC Reactor dan VCT-ICL

Gambar 4.8 menerangkan nilai THD tegangan sisi sekunder transformator saat keadaan berbeban. Bertambahnya nilai resistansi reaktor akan berimbas pada bertambahnya distorsi. Pada saat

menggunakan VCT-ICL, nilai THD bisa ditekan stabil hingga sekitar 0,22 %. Tentunya penekanan nilai THD akan terpenuhi jika nilai  $V_{comp}$  dapat memenuhi persamaan 2.28, jika tidak persamaan 2.28 tidak terpenuhi, maka pemasangan VCT tidak efektif dapat mengurangi distorsi.

Dengan menggunakan VCT-ICL, limiter pada saat keadaan *steady state* mendekati keadaan saat tanpa terpasang VCT-ICL. Hal ini dibuktikan dengan nilai THD hampir mendekati nol %, sehingga perangkat VCT-ICL tidak mengganggu sistem saat keadaan *steady state*. Hal tersebut berbeda dengan saat hanya menggunakan DC reactor. Bertambahnya nilai  $R_d$  menyebabkan bertambahnya pula distorsi pada saat *steady state*. Hal ini digambarkan dengan garis berwarna merah pada gambar 4.8. Penggunaan DC reactor sebagai pembatas arus *inrush* tidak mengantisipasi timbulnya distorsi. Sehingga penggunaannya dengan impedansi yang besar tidak direkomendasikan untuk *limiter* arus *inrush*.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa pemasangan VCT-ICL dapat secara efektif mengurangi arus *inrush* pada transformator daya 3 fasa. Pemasangan VCT-ICL diantara CB dan transformator daya otomatis memperbesar impedansi saluran yang mana dengan ini dapat menahan nilai puncak arus *inrush*. Namun *limiter* ini tidak seperti DC *reactor* yang hanya dapat mengurangi arus *inrush* sebanding bertambahnya nilai impedansi, namun tidak dapat mengantisipasi distorsi akibat besarnya nilai impedansi saluran yang dihasilkan. distorsi yang dihasilkan pada keadaan berbeban saat *steady state* ketika menggunakan VCT-ICL sangatlah kecil. Jika dinyatakan dalam THD, bernilai sekitar 0,22%.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## DAFTAR PUSTAKA








- [1] Rahnavard, R., Vilazadeh, M., Sharifian, A.A.B, and Hosseini, S.H. **Analitical Analysis of Transformer Inrush Current and Some New Techniques for Its Reduction.**
- [2] Tseng, H.T., and Chen, J.F. 2011. **“Voltage Compensation Type-Inrush Current Limiter For Reducing Power Transformer Inrush Current”**. IET Electric Power Applications. 10.1049/iet-epa.2011.0151.
- [3] C.E., Lin., C.L., Chen., Huang., and J.C., Yeh. 1993. **“Investigation Of Magnetising Inrush Current in Transformers. Part II – Harmonic Analysis”**. IEEE Transaction on Power Delivery 8, 1:255-263.
- [4] Abou-Safe, Abdolmutaleb and Kettleborough, Gordon. 2005. **“Modeling and Calculating the In-Rush Currents in Power Transformers”**. Damascus Univ. Journal Vol. (21)-No. (1)
- [5] **Inrush Current**, URL:<http://www.wikipedia.org>
- [6] Kuphaldt, Tony R. 2000-2002. **Lesson in Electric Circuit.**
- [7] IEEE Standart Transformer Commite. 2001. **Inrush Current Tutorial Session.**
- [8] Abdulsalam, S.G., and Xu, Wilsun. 2005. **“Analytical Study of Transformer inrush Current Transient and its Application”**. International Conference of Power System Transients (IPST’05). Montreal, Canada, June 19-23.
- [9] **Harmonisa**, URL:<http://www.wikipedia.org>
- [10] Risdaniar, Lasaro Brasta. 2009. **“Pemodelan dan Simulasi Penerapan Metode *Sequential Phase Energization* untuk Mengurangi Arus *Inrush* pada Transformator Daya Gardu Induk Kenjeran 150 KV dengan *Software* ATP”**. Institut Teknologi Sepuluh Nopember : Jurusan Teknik Elektro.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## LAMPIRAN A













### CONTOH TABEL KOMPONEN PADA *SOFTWARE* ATP

**Tabel A.1** Komponen Transformator pada ATP












Selection	Object name	Icon	ATP card	Description
<i>Ideal 1 phase</i>	TRAFO_I		SOURCE type 18	Single-phase ideal transformer.
<i>Ideal 3 phase</i>	TRAFO_I3		SOURCE type 18	3-phase ideal transformer.
<i>Saturable 1 phase</i>	TRAFO_S		BRANCH TRANSFORMER	Single-phase saturable transformer.
<i>Saturable 3 phase</i>	SATTRAFO		BRANCH TRANSFORMER	General saturable transformer. 3-phase. 2 or 3 windings.
<i># Sat. Y/Y 3-leg</i>	TRAYYH_3		BRANCH TRANSFORMER THREE PHASE	3-phase saturable transformer. High homopolar reluct. (3-leg). 3-ph node. Preprocessing of manufacturer data.
<i>BCTAN</i>	BCTAN		BRANCH Type 1...9	Direct support of BCTAN transformer matrix modeling.
<i>Hybrid model</i>	XFMR		BRANCH	Winding resistance, leakage inductance, topologically correct core, capacitance. Test report, design data or typical.












**Tabel A.2** Komponen Sumber Tegangan pada ATP

Selection	Object name	Icon	ATP card	Description
<i>AC source (1&amp;3)</i>	ACSOURCE		SOURCE type 14	AC source. Voltage or current. Single or 3-phase. Ungrounded or grounded. Phase voltage and rms
<i>DC type 11</i>	DC1PH		SOURCE type 11	DC step source. Voltage or current.
<i>Ramp type 12</i>	RAMP		SOURCE type 12	Ramp source. Voltage or current.
<i>Slope-Ramp type 13</i>	SLOPE_RA		SOURCE type 13	Two-slope ramp source. Voltage or current.
<i>Surge type 15</i>	SURGE		SOURCE type 15	Double exponential source Type-15. Voltage or current.
<i>Heidler type 15</i>	HEIDLER		SOURCE type 15	Heidler type source. Voltage or current.
<i>Standler</i>	STANDLER		SOURCE type 15	Standler type source. Voltage or current.
<i>Cigre</i>	CIGRE		SOURCE type 15	Cigre type source. Voltage or current.
<i>TACS source</i>	TACSSOUR		SOURCE type 60	TACS/MODELS controlled source. Voltage or current.
<i>Empirical type1</i>	SOUR_1		SOURCE type 1	Source with user defined time characteristic. Voltage or current.
<i>AC Ungrounded</i>	AC1PHUG		SOURCE type 14+18	Ungrounded AC source. Voltage only.
<i>DC Ungrounded</i>	DC1PHUG		SOURCE type 11+18	Ungrounded DC source. Voltage only.

**Tabel A.3** Komponen *Switch* pada ATP

Selection	Object name	Icon	ATP card	Description
<i>Switch time controlled</i>	TSWITCH		SWITCH type 0	Single or 3-phase time controlled switch. Multiple closing/openings. Dynamic icon; will open, will close...
<i>Switch time 3-ph</i>	SWIT_3XT		SWITCH type 0	Three-phase time controlled switch, Independent operation of phases.
<i>Switch voltage contr.</i>	SWITCHVC		SWITCH type 0	Voltage controlled switch.
<i>Diode (type 11)</i>	DIODE		SWITCH type 11	Diode. Switch type 11. Uncontrolled.
<i>Valve (type 11)</i>	SW_VALVE		SWITCH type 11	Valve/Thyristor. Switch type 11. TACS/MODELS- controlled. GIFU.
<i>Triac (type 12)</i>	TRIAC		SWITCH type 12	Double TACS/MODELS controlled switch.
<i>TACS switch (type 13)</i>	SW_TACS		SWITCH type 13	Simple TACS/MODELS controlled switch. GIFU.
<i>Measuring</i>	SWMEAS		SWITCH type 0	Measuring switch. Current measurements.
<i>Statistic switch</i>	SW_STAT		SWITCH	Statistic switch. See ATP   Settings / Switch/UM.
<i>Systematic switch</i>	SW_SYST		SWITCH	Systematic switch. See ATP   Settings / Switch/UM.
<i>Nonlinear diode</i>	DIODEN		SWITCH BRANCH	Ideal or nonlinear resistance with forward resistance and snubbers.

**Tabel A.4** Komponen Saluran Linier pada ATP

Selection	Object name	Icon	ATP card	Description
<i>Resistor</i>	RESISTOR		BRANCH type 0	Pure resistance in $\Omega$ .
<i>Capacitor</i>	CAP_RS		BRANCH type 0	Capacitor with damping resistor. C in $\mu\text{F}$ if $X_{\text{opt}}=0$ .
<i>Inductor</i>	IND_RP		BRANCH type 0	Inductor with damping resistor. Inductance in mH if $X_{\text{opt}}=0$ .
<i>RLC</i>	RLC		BRANCH type 0	R, L and C in series. Dynamic icon.
<i>RLC 3-ph</i>	RLC3		BRANCH type 0	3-phase R, L and C in series. Independent values in phases. Dynamic icon.
<i>RLC-Y 3-ph</i>	RLCY3		BRANCH type 0	3-phase R, L and C, Y coupling. Independent values in phases. Dynamic icon.
<i>RLC-D 3-ph</i>	RLCD3		BRANCH type 0	3-phase R, L and C, D coupling. Independent values in phases. Dynamic icon.
<i>C : U(0)</i>	CAP_U0		BRANCH + initial condition	Capacitor with initial condition.
<i>L : I(0)</i>	IND_I0		BRANCH + initial condition	Inductor with initial condition.

## RIWAYAT PENULIS



**Rudy Prasetyo** Lahir di Sidoarjo pada 07 Mei 1992 melalui rahim seorang wanita mulia Alm. Supraptini.. Sebelum masuk ke jurusan elektro ITS bidang studi Teknik Sistem Tenaga, penulis menempuh pendidikan D3 elektro industri di ITS dan lulus pada tahun 2013. Sebelum masuk ke jenjang kuliah, penulis menempuh pendidikan SMK jurusan multimedia di SMK Negeri 11 Surabaya yang sekarang berganti nama menjadi SMK Negeri 12 Surabaya.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**